

МАШИНОСТРОЕНИЕ MECHANICAL ENGINEERING

УДК 621.793.71

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

*Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. ПАНТЕЛЕЕНКО Ф. И.¹⁾,
канд. техн. наук ОКОВИТЫЙ В. А.¹⁾,
доктора техн. наук, профессора ДЕВОЙНО О. Г.¹⁾, АСТАШИНСКИЙ В. М.²⁾,
асп. ОКОВИТЫЙ В. В.¹⁾ канд. техн. наук СОБОЛЕВСКИЙ С. Б.³⁾*

¹⁾Белорусский национальный технический университет,

²⁾Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси,

³⁾РУП БелНИИТ «Транстехника»

E-mail: scvdmmed@bntu.by

В статье приведены результаты исследования влияния параметров плазменной струи (ток, дистанция напыления, расход плазмообразующего газа азота), фракционного состава исходного порошка и степени охлаждения сжатым воздухом на характеристики антиметеоритных покрытий. В силу простоты аппаратного оформления, а также ощутимой эффективности в настоящее время для нанесения керамического слоя на основе частичного стабилизированного диоксида циркония в основном используется метод плазменного напыления в воздушной среде. Главной особенностью структуры плазменных антиметеоритных покрытий является то, что для увеличения допустимых деформаций керамики в ней формируют некоторую контролируруемую пористость. Идея создания структур с контролируемой пористостью основана на том, что пористые тела менее склонны к макроскопическому растрескиванию под действием внутренних напряжений вследствие торможения либо отклонения растущей трещины порами, а также низкого модуля упругости пористых материалов по сравнению с компактными.

Методика проводимой работы основывалась на комплексных металлографических, рентгеноструктурных и электронно-микроскопических исследованиях антиметеоритного покрытия на основе диоксида циркония.

Для обеспечения высокой ударной вязкости структура антиметеоритного покрытия на основе диоксида циркония должна содержать более 90 % тетрагональной фазы диоксида циркония и менее 10 % моноклинной. При этом фазовый состав и ударная вязкость покрытий зависят как от химического состава, так и от способа получения порошка. Оптимизацию параметров напыления антиметеоритных покрытий на основе диоксида циркония проводили на основании получения максимального коэффициента использования материала и максимального содержания тетрагональной фазы диоксида циркония в напыленном покрытии.

Ключевые слова: плазменные композиционные покрытия, технология нанесения, диоксид циркония, системы космических аппаратов.

Ил. 6. Библиогр.: 20 назв.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR APPLICATION OF PLASMA COMPOSITE COATINGS BASED ON ZIRCONIUM DIOXIDE FOR SPACECRAFT SYSTEMS

*PANTELEENKO F. I.¹⁾, OKOVITY V. A.¹⁾, DEVOINO O. G.¹⁾, ASTASHINSKY V. M.²⁾,
OKOVITY V. V.¹⁾, SOBOLEWSKI S. B.³⁾*

¹⁾Belarusian National Technical University,

²⁾A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,

³⁾RUE Belarusian Scientific-Research Institute of Transport "Transtekhnika"

The paper presents investigation results pertaining to the influence of such parameters as plasma jet (current, spraying distance, expenditure of plasma-forming gas – nitrogen), fraction composition of an initial powder and cooling rate with compressed air on characteristics of anti-meteoritic coatings. Due to simplicity of the apparatus design and its tangible efficiency

a method of plasma spraying in aerial environment is mainly used presently for application of ceramic layer on the basis of partial stabilized zirconium dioxide. The main peculiar feature of plasma anti-meteoritic coating structure is formation of some controlled porosity in order to increase permissible deformations in ceramics. The idea to create structures with controlled porosity is based on the fact that porous bodies are less liable to macroscopic scattering of cracks under the action of internal stresses due to slowing-down or deviation of an extending crack by pores and also due to low elasticity modulus of porous materials in comparison with compact ones.

Methodology of the executed research works has been based on complex metallographic, X-ray and electronic and microscopic investigations of anti-meteoritic coatings on the basis of zirconium dioxide.

In order to ensure high impact strength the structure of anti-meteoritic coatings on the basis of zirconium dioxide should contain more than 90 % of tetragonal phase of zirconium dioxide and not less than 10 % of monoclinic phase. In this case phase composition and impact strength of coatings depend on chemical composition and production method of the powder. Optimization of parameters for spraying anti-meteoritic coatings based on zirconium dioxide has been carried out according to obtaining maximum coefficient of material usage and maximum content of tetragonal phase of zirconium dioxide in the sprayed coatings.

Keywords: plasma composite coatings, application technology, zirconium dioxide, spacecraft systems.

Fig. 6. Ref.: 20 titles.

Введение. Бурное развитие в последние годы конструкционной керамики в значительной мере определило возросший интерес к промышленному использованию керамических покрытий, прежде всего в области высоких температур, – высокопрочных и коррозионностойких, а также антиметеоритных покрытий [1–5]. Среди множества решаемых задач следует отметить проблему создания новых антиметеоритных материалов, способных противостоять воздействию космического вакуума. Основным методом, используемым для нанесения антиметеоритных покрытий из диоксида циркония, является плазменное напыление (до 90 % разработок) [6–9].

К антиметеоритным покрытиям предъявляются жесткие требования. Такие покрытия должны [6]:

- характеризоваться плавным изменением физико-механических свойств (пористости, микротвердости, модулей упругости) в сечении от металлической основы к внешнему керамическому слою;
- выдерживать многократные циклы тепловых смен;
- сохранять газонепроницаемость в условиях эксплуатации и обеспечивать при этом достаточно высокий уровень эрозионной прочности.

В общем случае антиметеоритные покрытия представляют собой многослойную систему, включающую металлический подслой и внешний керамический слой. Основной причиной разрушения плазменных покрытий являются термомеханические напряжения, возникающие

вследствие рассогласования термического расширения металла основы и керамического слоя, а также неравномерности распределения температурного поля в покрытии. Термомеханические напряжения усугубляются действием остаточных напряжений, возникающих в покрытии при напылении, и ослабляются эффектами пластичности и ползучести, реализующимися в металлическом подслое [9].

В качестве материалов для керамического слоя антиметеоритных покрытий часто применяют композиции на основе частичного стабилизированного диоксида циркония (ЧСЦД) [5, 9]. Это обусловлено рядом его свойств: сравнительно большим коэффициентом линейного термического расширения и возможностью обеспечения высоких механических свойств упрочненной керамики, в частности ударной вязкости.

В силу простоты аппаратного оформления, а также ощутимой эффективности в настоящее время для нанесения керамического слоя на основе ЧСЦД в основном используется метод плазменного напыления в воздушной среде [9]. Главной особенностью структуры плазменных антиметеоритных покрытий является то, что для увеличения допустимых деформаций керамики в ней формируют некоторую контролируемую пористость [10]. Идея создания структур с контролируемой пористостью основана на том, что пористые тела менее склонны к макроскопическому растрескиванию под действием внутренних напряжений вследствие торможения либо отклонения растущей трещины порами, а также низкого модуля

упругости пористых материалов по сравнению с компактными.

Более высокая пористость керамического слоя плазменного покрытия достигается изменением режимов напыления (например, увеличением дистанции напыления), увеличением размера напыляемых частиц [11]. Важнейшими характеристиками структуры покрытий являются также размер и форма пор [12]. Малые, острые и угловатые поры выступают как концентраторы напряжений и могут вызвать снижение вязкости разрушения керамики. В то же время большие и округлые поры приводят к притуплению и торможению трещин. Следует однако отметить, что вследствие снижения прочности пористых покрытий для конкретных условий испытаний существует оптимальная величина общей пористости покрытия, при которой достигается его максимальная долговечность [5]. Параметры плазменного напыления в значительной мере влияют на фазовый состав покрытия из ЧСДЦ, его пористость, а также уровень остаточных напряжений в покрытии. Анализ известных разработок [13, 14] показывает, что технологические параметры напыления следует разделить на группы, определяющие:

- степень проплавления порошка в плазменной струе;
- скорость напыляемых частиц;
- интенсивность охлаждения покрытия и основы при напылении.

Установлено, что температура напыляемых частиц значительно влияет на отношение количества образующихся кубической и тетрагональной фаз ZrO_2 [4, 5, 10]. В частности, существует определенный уровень силы тока дуги плазмотрона, превышение которого приводит к скачкообразному увеличению долговечности $ZrO_2 - 7\% Y_2O_3$ -покрытия, обусловленного полным проплавлением напыляемых частиц [15]. Дальнейший рост силы тока мало влияет на свойства покрытия. Данный эффект, очевидно, связан с тем, что покрытия из непроплавленных частиц ЧСДЦ содержат повышенное количество моноклинной фазы ZrO_2 [16]. В общем случае увеличение мощности плазмотрона, ведущее к повышению температуры и скорости частиц, применение специальных наса-

док и т. д. приводят к увеличению плотности и прочности покрытий [17, 18]. Интенсивность охлаждения покрытия и подложки при напылении, определяемая скоростью и характером охлаждения формирующегося слоя:

- влияет на размер и, следовательно, долговечность фазовых включений;
- влияет на прочность межчастичных контактов в покрытии;
- определяет вид и уровень остаточных напряжений в покрытии [19].

Оптимизация процесса нанесения антиметеоритного покрытия на основе диоксида циркония. Оптимизацию выполняли по методике, изложенной в [5, 19]. На первом этапе оптимизацию на основании получения максимального коэффициента использования материала (КИМ). Вначале КИМ определяли при различных значениях тока (400; 500; 600 и 700 А) и расхода плазмообразующего газа R_{N_2} (40; 45; 50 и 55 л/мин), но с постоянной дистанцией напыления $L = 120$ мм (рис. 1). На следующем этапе оптимальные значения дистанции напыления определяли с постоянными величинами тока и расхода плазмообразующего газа ($I = 600$ А; $R_{N_2} = 50$ л/мин) (рис. 2). И, наконец, для оптимальной дистанции напыления и при постоянном значении R_{N_2} изменялся ток ($L = 110$ мм; $R_{N_2} = 50$ л/мин) (рис. 2). Выполняли напыление покрытий с и без охлаждения порошком фракционного состава (<50 мкм).

Увеличение тока и расхода плазмообразующего газа (рис. 1) до определенных значений вызывает увеличение КИМ, так как эти параметры влияют на степень проплавления порошка [1–4]. Дальнейшее их повышение приводит к тому, что частицы перегреваются и при ударе о подложку разбрызгиваются, следовательно, КИМ уменьшается. При увеличении расхода N_2 происходит уменьшение значений тока для максимального КИМ. Для $R_{N_2} = 55$ л/мин максимальный КИМ = 56 % соответствует $I = 450$ А, для $R_{N_2} = 50$ л/мин максимальный КИМ = 62 % соответствует $I = 600$ А, для $R_{N_2} = 45$ л/мин максимальный КИМ = 57 % соответствует $I = 650$ А. Похожая тенденция сохраняется и при изменении дистанции напыления (рис. 2) при оптимизации значений расхода N_2 и тока (в рассматриваемом случае $R_{N_2} = 50$ л/мин; $I = 600$ А).

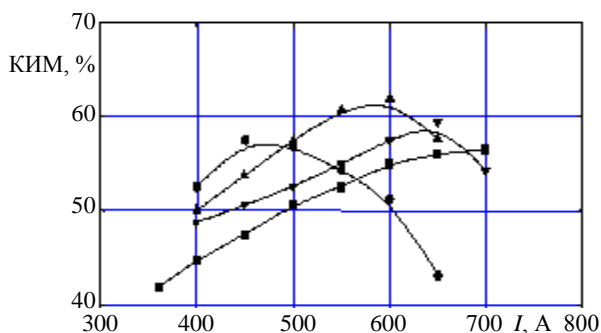


Рис. 1. Влияние тока и расхода плазмообразующего газа (N_2) на КИМ при напылении покрытий на основе ZrO_2 при $L = 120$ мм (размер порошка – менее 50 мкм):
● – $R_{N_2} = 55$ л/мин; ▲ – 50; ▼ – 45; ■ – 40 л/мин

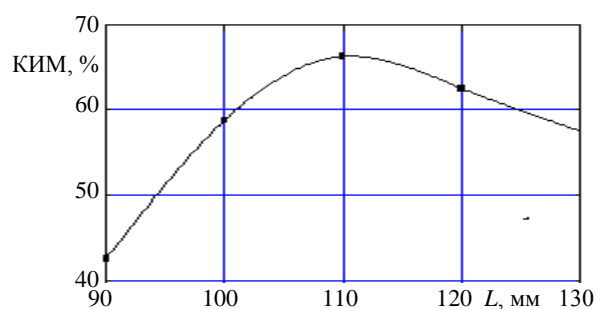


Рис. 2. Влияние дистанции напыления на величину КИМ при напылении покрытий на основе ZrO_2 при $R_{N_2} = 50$ л/мин, $I = 500$ А (размер порошка – менее 50 мкм)

При малых дистанциях напыления частица не успевает достаточно нагреться и достигает подложки с температурой менее $t_{пл}$. В рассматриваемом случае возрастание КИМ продолжается до $L = 110$ мм. Дальнейшее увеличение дистанции напыления приводит к тому, что частица

из-за длительного нахождения в струе переплавляется и при ударе о подложку разбрызгивается, соответственно КИМ падает [5].

При напылении антиметеоритного покрытия на оптимальных режимах с охлаждением происходит уменьшение КИМ с 65 до 62 % при расходе сжатого воздуха 1,0 м³/мин и давлении $p = 4,0$ атм и до 52 % при 1,5 м³/мин и $p = 6,0$ атм (рис. 3), что существенно, поскольку стоимость 1 кг порошка $ZrO_2-Y_2O_3$ составляет около 60–100 дол. США. Тем не менее при напылении с охлаждением и увеличении тока до 600 А повышается содержание тетрагональной фазы (рис. 4б) и снижается содержание моноклинной (рис. 4а), что обеспечивает высокую ударную вязкость антиметеоритного покрытия на основе ЧСДЦ.

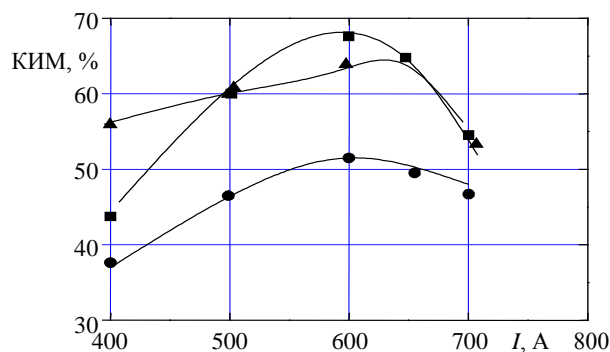


Рис. 3. Влияние тока на величину КИМ при напылении покрытия на основе ZrO_2 при $L = 110$ мм, $R_{N_2} = 50$ л/мин (размер порошка – менее 50 мкм):
● – расход сжатого воздуха 1,5 м³/мин, $p = 6,0$ атм;
▲ – 1,0 м³/мин, 4,0 атм; ■ – без охлаждения

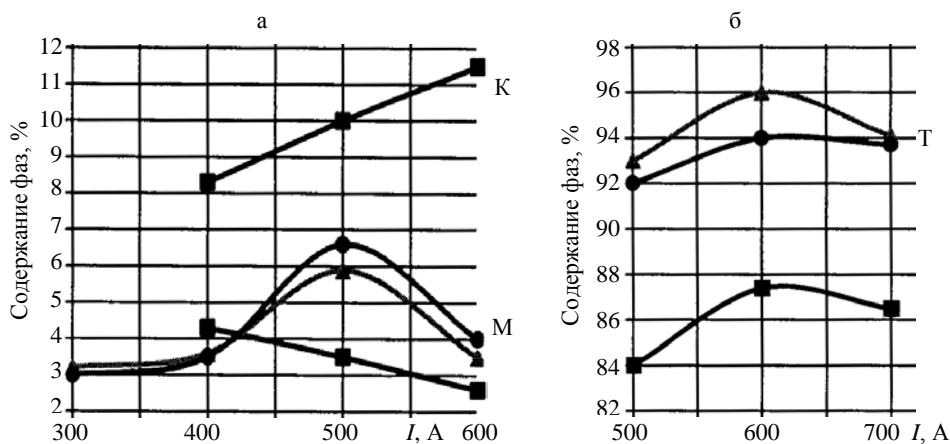


Рис. 4. Влияние величины тока дуги плазматрона и степени охлаждения на фазовый состав $ZrO_2-Y_2O_3$ покрытия при $L = 110$ мм, $R_{N_2} = 8$ л/мин (размер частиц – менее 50 мкм): а – моноклинная (М), кубическая (К); б – тетрагональная (Т);
● – расход сжатого воздуха 1,5 м³/мин, $p = 6,0$ атм; ▲ – 1,0 м³/мин, $p = 4,0$ атм; ■ – без охлаждения

Влияние скорости подачи порошка на КИМ показано на рис. 5. Так как в формировании покрытия принимают участие все частицы в плазменной струе, наилучшими свойствами будут обладать покрытия, отвечающие плазменным режимам, где доля расплавленных частиц в струе и их концентрация максимальны.

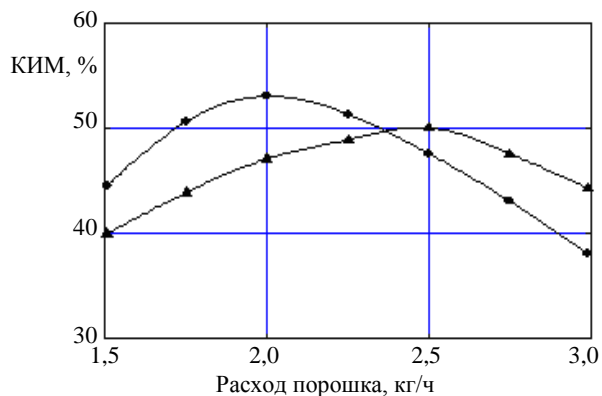


Рис. 5. Влияние скорости подачи порошка на КИМ при напылении покрытий на основе ZrO_2 при $R_{N_2} = 50$ л/мин, $I = 600$ А, $L = 110$ мм (размер частиц порошка – менее 50 мкм): ● – расход сжатого воздуха 1,0 м³/мин, $p = 4,0$ атм; ▲ – 1,5 м³/мин, 6,0 атм

Для определенных выше оптимальных режимов максимальный КИМ соответствует расходу порошка $R_{пор} = 2$ кг/ч, при дальнейшем увеличении расхода КИМ уменьшается, поскольку тепловой энергии плазменной струи не хватает для расплавления всех подаваемых в струю частиц. С увеличением степени охла-

ждения при одинаковых скоростях подачи порошка КИМ уменьшается [1–5].

При увеличении толщины керамического слоя его долговечность определяется двумя противоположными факторами:

1) с ростом толщины керамического слоя уменьшается его проницаемость для газов и снижается температура подслоя, что повышает долговечность покрытия;

2) с ростом толщины керамического слоя резко возрастают напряжения в покрытии (как остаточные, так и возникающие в процессе нагрева–охлаждения), что снижает долговечность.

Для различных фракций порошка $ZrO_2 - 7,1\% Y_2O_3$ (<50; 50–63; 63–100; 100–160 мкм) при различных токах дуги I (400; 500; 600 А) были измерены КИМ и процентное содержание фаз в порошке. Влияние размера частиц на КИМ показано на рис. 6а. С увеличением тока дуги для фракций порошка ZrO_2 (<50 и 50–63 мкм) КИМ растет до 650 А, на более жестких режимах частицы переплавляются и КИМ уменьшается [5]. Для крупных фракций (63–100 и 100–160 мкм) КИМ постоянно растет, даже при 700 А, частицы недостаточно проплавлены и КИМ небольшой – порядка 35 %. При увеличении размера фракции с <50 до 100–160 мкм в покрытии уменьшится количество тетрагональной фазы (рис. 6б), приводящее к ухудшению ударной вязкости.

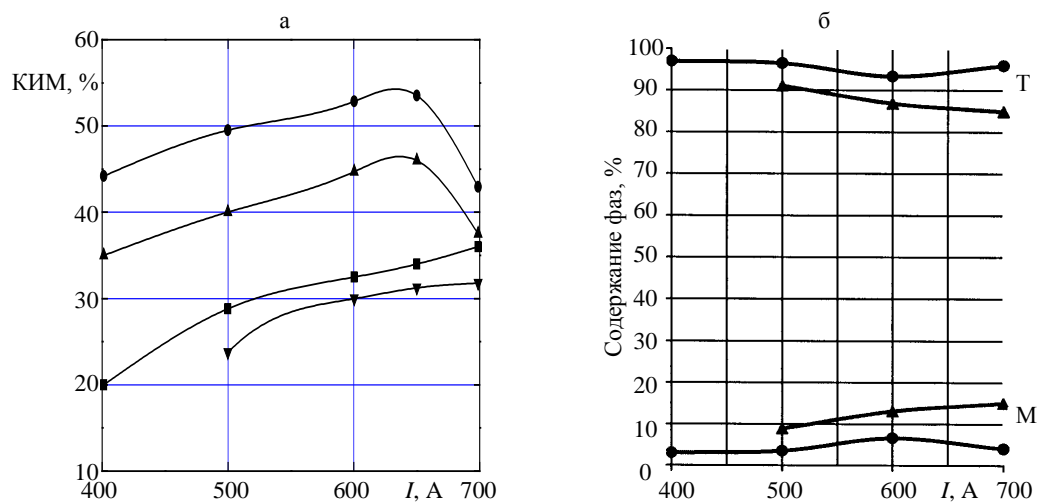


Рис. 6. Влияние тока и размеров частиц порошка на величину КИМ (а) и фазовый состав (б) при напылении покрытий на основе ZrO_2 при $R_{N_2} = 50$ л/мин; $L = 110$ мм; $R_{пор} = 2$ кг/ч: ● – <50 мкм; ▲ – 50–63; ■ – 63–100; ▼ – 100–160 мкм

ВЫВОДЫ

1. Для обеспечения высокой ударной вязкости структура антиметеоритного покрытия на основе диоксида циркония должна содержать более 90 % тетрагональной фазы диоксида циркония и менее 10 % моноклинной. При этом фазовый состав и ударная вязкость покрытий зависят как от химического состава, так и от способа получения порошка.

2. Оптимизацию параметров напыления антиметеоритных покрытий на основе диоксида циркония проводили на основании получения максимального коэффициента использования материала и максимального содержания тетрагональной фазы диоксида циркония в напыленном покрытии. Проведены исследования влияния параметров плазменной струи (ток, дистанция напыления, расход плазмообразующего газа азота), фракционного состава исходного порошка и степени охлаждения сжатым воздухом на характеристики антиметеоритных покрытий.

3. При оптимальных режимах (ток дуги 600 А; дистанция напыления 110 мм; расход плазмообразующего газа азота 50 л/мин; фракционный состав порошка диоксида циркония <50 мкм; расход сжатого воздуха для охлаждения 1,0 м³/мин при $p = 4,0$ атм) получили антиметеоритные покрытия на основе диоксида циркония с коэффициентом использования материала 62 %, содержание тетрагональной фазы 96 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Нанесение** покрытий плазмой / В. В. Кудинов [и др.]. – М.: Наука, 1990. – 407 с.
2. Газотермические покрытия / В. Н. Анциферов [и др.]; под ред. В. Н. Анциферова. – Екатеринбург: Наука, 1994. – 317 с.
3. **Куприянов, И. Л.** Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления / И. Л. Куприянов, М. А. Геллер. – Минск: Навука і тэхніка, 1990. – 176 с.
4. **Газотермическое** напыление композиционных порошков / А. Я. Кулик [и др.]. – Л.: Машиностроение, 1985. – 199 с.
5. **Теплозащитные** покрытия на основе ZrO_2 / А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск: НИИ ПМ с ОП, 1998. – 128 с.
6. **Акишин, А. И.** Космическое материаловедение: метод. и учеб. пособие / А. И. Акишин. – М.: НИИЯФ МГУ, 2007. – С. 209.
7. **Модель космоса:** в 2 т. / под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. – Т. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. – 8-е изд. – М.: Книжный дом «Университет», 2007. – 1143 с.

8. **Effects of Space Conditions on Materials** / Ed. A. I. Aki-shin. – New York: Nova Science Publ., 2001. – 199 p.

9. **Процессы** плазменного нанесения покрытий: теория и практика / А. Ф. Ильющенко [и др.]: под общ. ред. А. П. Достанко, П. А. Витязя. – Минск: Армита – Маркетинг, Менеджмент, 1999. – 543 с.

10. **Safai, S.** Plasma Sprayed Coating – Their Ultramicro-structure / S. Safai, H. Herman // *Advances in Surface Coating Technology. Paper 5 International Conference, London, 13–15 Feb., 1978.* – London: Pub. Welding Institute, 1978. – P. 1–14.

11. **Хасуй, А.** Техника напыления / А. Хасуй. – М.: Машиностроение, 1975. – 286 с.

12. **Борисов, Ю. С.** Применение плазменных покрытий в машиностроении / Ю. С. Борисов, Д. И. Гнатенко, А. С. Куликов // *Защитные покрытия на металлах: сб. статей.* – Киев: Навук. думка, 1979. – Вып. 13. – С. 103–106.

13. **Eschnauer, H.** Pulverfoermige Keramische Werkstoffe zum Plasmaspritzen / H. Eschnauer [et al.] // *Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft.* – 1980. – Vol. 57, No 4–5. – P. 94–98.

14. **McClocklin, R. S.** Thermal-Spray Coatings for Computer Components / R. S. McClocklin, B. A. Teal // *Journal of Vacuum Science & Technology.* – 1975. – Т. 12, № 4. – P. 784–785.

15. **Вяльцев, А. М.** Синтез керамических материалов для высокоплотных покрытий / А. М. Вяльцев // *Получение и исследование свойств новых материалов: сб. статей.* – Киев: ИПМ, 1988. – С. 149–153.

16. **Современные** технологии нанесения теплозащитных керамических покрытий / В. С. Ивашко [и др.] // *Известия Белорусской инженерной академии.* – 1997. – № 2 (4). – С. 28–32.

17. **Aspects of Deposition of the Thermal Barrier Coatings** / A. Ilyuschenko [et al.] // *TECHNOLOGY-97: Proc. of the International Conf. – Bratislava (Slovakia), 1997.* – P. 672–673.

18. **Effect of Chemical, Phase Composition and Heat Resistance of a Ceramic Layer Coating on Resistance to Temperature Cycling** / P. Vityaz [et al.] // *Danube Adria Association for Automation & Manufacturing: Proc. of the 4-st International Conference.* – Tallinn, 1997. – P. 137–140.

19. **Особенности** формирования керамического слоя теплозащитного покрытия / П. А. Витязь [и др.] // *Порошковая металлургия.* – 1997. – № 20. – С. 81–86.

REFERENCES

1. **Kudinov, V. V.,** Pekshev, P. Iu., Belashchenko, V. E., Solonenko, O. P., & Safiullin, V. A. (1990) *Application of Plasma Coating.* Moscow, Nauka. 407 p. (in Russian).
2. **Antsiferov, V. N.,** Shmakov, A. M., Ageev, S. S., & Bulanov, V. Ia. (1994) *Gas-Thermal Coatings.* Ekaterinburg, Nauka. 317 p. (in Russian).
3. **Kupriyanov, I. L.,** & Geller, M. A. (1990) *Gas-Thermal Coatings with High Binding Strength.* Minsk, Navuka i Tekhnika. 176 p. (in Russian).
4. **Kulik, A. Ya.,** Borisov, Iu. S., Mnukhin, A. S., & Nikitin, M. D. (1985) *Gas-Thermal Evaporation of Composite Powders.* Leningrad, Mashinostroenie. 199 p. (in Russian).

5. **Il'iushchenko, A. F.**, Ivashko, V. S., Okovityi, V. A., & Sobolevskii, S. B. (1998) *Heat-Protective Coatings on ZrO₂ basis*. Minsk, Research Institute of Powder Metallurgy with Pilot Production. 128 p. (in Russian).
6. **Akishin, A. I.** (2007) *Space Material Science*. Moscow, Research Institute of Nuclear Physics, Moscow State University. 209 p. (in Russian).
7. **Novikov, L. S.**, & Panasiuk, M. I. (2007) *Model Space. Vol. 2. Impact of Space Environment on Materials and Equipment of Spacecrafts*. Moscow, Bookshop "Universitet". 1143 p. (in Russian).
8. **Akishin, A. I.** (2001) *Effects of Space Conditions on Materials*. New York, Nova Science Publ. 199 p.
9. **Ilyushchenko, A. F.**, Kundas, S. P., Dostanko, A. P., Okovityi, V. A., Gurevich, V. A., Gromyko, G. F., Zaiats, G. M., Kuz'menkov, A. N., & Vitiaz', P. A. (1999) *Processes of Plasma Coating Application: Theory and Practices*. Minsk: Armita – Marketing, Management, 543 p. (in Russian).
10. **Safai, S.**, & Herman, H. (1978) Plasma Sprayed Coating – Their Ultramicrostructure. *Advances in Surface Coating Technology. Paper 5 International Conference*. London: Pub. Welding Institute, 1–14.
11. **Hasuy, A.** (1975) *Spraying Techniques*. Moscow, Mashinostroenie. 286 p. (in Russian).
12. **Borisov, Yu. S.**, Gnatenko, D. I., & Kulikov, A. S. (1979) Application of Plasma Coating in Mechanical Engineering. Protective Coatings on Metal. Collected Book. Kiev: Navukova Dumka [Scientific Thought], 13, 103–106 (in Russian).
13. **Eschnauer, H.**, Kilp, F., Mundinger, K., Kuehn, H., & Stitz, O. (1980) Pulverfoermige Keramische Werkstoffe zum Plasmaspritzen [Ceramic Powers for Plasma Spraying]. *Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft*, 57 (4–5), 94–98 (German).
14. **McClocklin, R. S.**, & Teal, B. A. (1975) Thermal-Spray Coatings for Computer Components. *Journal of Vacuum Science & Technology*, 12 (4), 784–785. Doi.org/10.1116/1.568671.
15. **Vialtsev, A. M.** (1988) Synthesis of Ceramic Materials for High-Density Coatings. Obtaining and Investigation of New Material Properties. Collection of Articles. Kiev: IPM Publ. 149–153 (in Russian).
16. **Ivashko, V. S.**, Il'iushchenko, A. F., Okovityi, V. A., & Sobolevskii, S. B. (1997) Modern Technologies for Application of Thermal Protective Ceramic Coatings. *Izvestiia Belorusskoi Inzhenernoi Akademii* [News of Belarusian Engineering Academy], 2 (4), 28–32 (in Russian).
17. **Il'iushchenko, A.**, Okovityi, V., & Sobolevskii, S. (1997) Aspects of Deposition of the Thermal Barrier Coatings. *Proc. of the International Conf. TECHNOLOGY-97*, 12 September 1997. Bratislava, Slovakia, 672–673.
18. **Vityaz, P.**, Il'iushchenko, A., & Okovityi, V. (1997) Effect of Chemical, Phase Composition and Heat Resistance of a Ceramic Layer Coating on Resistance to Temperature Cycling. *Proc. of the 4-st International Conference Danube Adria Association for Automation & Manufacturing*, 14 December 1997. Tallinn, Estonia, 137–140.
19. **Vitiaz', P. A.**, Il'iushchenko, A. F., Okovityi, V. A., & Ivashko, V. S. (1997) Specific Features of Ceramic Layer Formation in Thermal Protective Coating. *Poroshkovaya Metallurgiya* [Powder Metallurgy], 20, 81–86 (in Russian).

Поступила 14.10.2014

УДК 621.9.011:517.962.1

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ДИНАМИКИ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ ФРЕЗЕРНО-СВЕРЛИЛЬНО-РАСТОЧНОГО СТАНКА С МОНОСТОЙКОЙ

*Докт. физ.-мат. наук, проф. ВАСИЛЕВИЧ Ю. В.¹⁾, канд. техн. наук, доц. ДОВНАР С. С.¹⁾,
инженеры ТРУСКОВСКИЙ А. С.²⁾, ШУМСКИЙ И. И.²⁾*

¹⁾Белорусский национальный технический университет,
²⁾ОАО «МЗОР» – управляющая компания холдинга «Белстанкоинструмент»

E-mail: ssdov@tut.by

Проведен МКЭ-анализ динамики несущей системы тяжелого станка. Это перспективный структурный вариант для крупногабаритного многоцелевого станка с горизонтальным ползуном. Каретка и ползун перемещаются вертикально по субтильной моностойке. В существующем станке-аналоге используется жесткая двойная стойка. Выполнены статический, модальный и гармонический анализы несущей системы с моностойкой МКЭ-моделированием до изготовления опытного образца. Расчеты для станка-аналога показали хорошее совпадение МКЭ-расчета с экспериментами.

Выявлены шесть общестаночных резонансов несущей системы. Из них осциллирующие силы резания активно возбуждают три-четыре резонансные моды. Установлены диапазоны изгибно-крутильных (20–40 Гц) и клевковых резонансов (70–90 Гц). Существенно выше (от 140 Гц) начинается диапазон многоволновых резонансов, которые связаны с изгибными колебаниями ползуна и согласованными с ними выпучиваниями стенок стойки. Показана стабильность картины резонансов. Наиболее опасен крутильный резонанс стойки на частоте около 40 Гц. Жесткость на шпинделе падает до